



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

INSTITUTE OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

PŘEDPJATÝ PÁS PŘES HLUBOKÉ ÚDOLÍ

STRESS RIBBON BRIDGE ACROSS THE DEEP VALLEY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

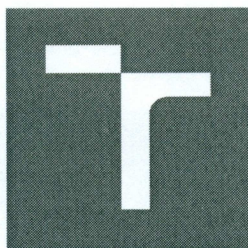
Bc. Gabriela Tomisová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. RADIM NEČAS, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
PRACOVISŤE	Ústav betonových a zděných konstrukcí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Gabriela Tomisová
NÁZEV	Předpjatý pás přes hluboké údolí
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Radim Nečas, Ph.D.
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. RNDr. Ing. Petr Štěpánek, CSc.
Vedoucí ústavu



prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Podklady:

Situace, příčný a podélný řez, geotechnické poměry.

Základní normy:

ČSN 73 6201 Projektování mostních objektů.

ČSN 73 6214 Navrhování betonových mostních konstrukcí.

ČSN EN 1990 včetně změny A1: Zásady navrhování konstrukcí.

ČSN EN 1991-2: Zatížení mostů dopravou.

ČSN EN 1992-1-1: Navrhování betonových konstrukcí. Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby.

ČSN EN 1992-2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady.

Literatura doporučená vedoucím diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Pro zadaný problém navrhnete dvě až tři varianty řešení a zhodnotíte je.

Ve výběru varianty se zaměřte na mostní konstrukci ve formě předpjatého pásu.

Podrobný návrh nosné konstrukce vybrané varianty mostu proveďte podle mezních stavů včetně zohlednění vlivu výstavby mostu na jeho návrh.

Ostatní úpravy provádějte podle pokynů vedoucího diplomové práce.

Požadované výstupy:

Textová část (obsahuje průvodní zprávu a ostatní náležitosti podle níže uvedených směrnic)

Přílohy textové části:

P1. Použité podklady a varianty řešení

P2. Výkresy (přehledné, podrobné a detaily v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

P3. Stavební postup a vizualizace

P4. Statický výpočet (v rozsahu určeném vedoucím diplomové práce)

Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP (1x).

Popisný soubor závěrečné práce (1x).

Diplomová práce bude odevzdána v listinné a elektronické formě podle směrnic a 1x na CD.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).



Ing. Radim Nečas, Ph.D.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce je návrh lávky přes hluboké údolí. Konstrukce lávky je tvořena předpjatým pásem s externími kabely a je dopnuta finálními kabely. Mostovka je vedena v parabolickém oblouku, visuté kabely jsou vedeny ve skloněných rovinách. Lávka byla vymodelována pro posouzení v podélném směru v programu Ansys 14.0 a pro posouzení příčného směru v programu Scia Engineer 15.1. Model byl řešen nelineárně, a to v několika fázích. V programu Scia Engineer byl také vymodelován pilíř pro posouzení lokálních účinků zatížení. Lávka byla posouzena z hlediska dynamických účinků na konstrukci. Návrh je proveden dle příslušných platných norem.

KLÍČOVÁ SLOVA

Přepjatý pás, lávka pro pěší, visutá lávka, předpětí, vyztužený beton, Ansys, Scia Engineer, model, nelineární výpočet, postup výstavby, harmonická analýza

ABSTRACT

The topic of this thesis is a design of stress ribbon bridge across the deep valley. The construction of the footbridge contains stress ribbon bridge with external cables and final prestressing tendons. The bridge deck is in a parabolic arc and the suspension clables are in two bend down parabolic arcs. The construction is reproduced for evaluation of longitudinal direction in the programme Ansys 14.0 and for transversal direction in the programme Scia Engineer 15.1. The model was solved nonlinearly and in several phases. The pier was reproduced in the programme Scia Engineer 15.1 for local effect of action. The construction was evaluated for dynamic action. The construction is assessed according to the actual EN standards.

KEYWORDS

Stress ribbon bridge, footbride, suspension bridge, prestress, reinforced concrete, Ansys, Scia Engineer, model, nonlinear calculation, construction procerdure, harmonious analyse

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Gabriela Tomisová *Předpjatý pás přes hluboké údolí*. Brno, 2017. 44 s., 256 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav
betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce Ing. Radim Nečas, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 7. 1. 2017

Bc. Gabriela Tomisová
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu práce, panu Ing. Radimovi Nečasovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky při konzultacích a vypracovávání diplomové práce.

Dále děkuji svým spolužákům a kamarádům, kteří mi vždy ochotně a trpělivě pomáhali.

Za podporu, nejen v době studia, však děkuji nejvíce svým rodičům a sestře, kteří mne vždy podporovali a důvěřovali mi.

V Brně dne 7. 1. 2017

Bc. Gabriela Tomisová
autor práce



FAKULTA
STAVEBNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
Přepjatý pás přes hluboké údolí

Bc. Gabriela TOMISOVÁ
2017



Obsah

1	ÚVOD	10
1.1	OBECNÉ INFORMACE	10
1.1.1	ÚČEL LÁVKY	10
1.1.2	SITUOVÁNÍ MOSTU	10
1.1.3	GEOLOGICKÉ PODMÍNKY LOKALITY MOSTU	12
2	VARIANTY ŘEŠENÍ	12
2.1	VARIANTA 1	12
2.2	VARIANTA 2	13
2.3	VARIANTA 3	15
2.4	VÝBĚR VARIANTY	16
3	VYBRANÁ VARIANTA – PŘEDPJATÝ PÁS	17
3.1	ZÁKLADNÍ ÚDAJE	17
3.1.1	TECHNICKÉ PROVEDENÍ	18
3.1.2	NÁVRH PŘEDPĚTÍ	19
3.1.3	ODVODNĚNÍ	19
3.1.4	ZALOŽENÍ STAVBY	19
3.2	FÁZE VÝSTAVBY	20
3.3	MATERIÁLY	20
3.3.1	BETON	20
3.3.2	BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ	21
3.3.3	PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ	21
3.4	MODEL LÁVKY V ANSYSU	21
3.4.1	STATICKÝ SYSTÉM	21
3.4.2	MODEL KONSTRUKCE	21
3.4.3	ZATÍŽENÍ A KOMBINACE	30
3.4.4	POSOUZENÍ MODELU	33
3.5	MODEL V PROGRAMU SCIA ENGINEER	35
3.5.1	POPIS MODELU	36
3.5.2	ZATÍŽENÍ A KOMBINACE	37
3.5.3	POSOUZENÍ MODELU	38
3.5.4	PILÍŘ	39
4	MODÁLNÍ ANALÝZA	40
4.1	HARMONICKÁ ODEZVA	40
5	ZÁVĚR	41



6	SEZNAMY POUŽITÝCH ZDROJŮ	44
6.1	NORMY.....	44
6.2	ODBORNÁ LITERATURA.....	44
6.3	WEBOVÉ STRÁNKY	44
7	SEZNAM OBRÁZKŮ	43



1 ÚVOD

Cílem diplomové práce je navrhnout lávku přes hluboké údolí. Přesná lokalita mostu nebyla zadána, pro formální účely byla tedy lávka umístěna přes údolí blízko Bubovic ve středních Čechách. Lávka propojuje dvě turistické stezky. Nachází se v extravilánu a její geometrie je volena tak, aby nenarušila přirozený ráz krajiny. Konstrukce lávky je tedy lehká, vzdušná a esteticky hodnotná.

Byly vypracovány 3 základní varianty, které byly objektivně zhodnoceny z hlediska technické náročnosti, vhodnosti pro danou lokalitu a proveditelnosti. Vybraná varianta byla podrobněji zpracována. Byla zvolena varianta předpjatého pásu, který je zavěšen na externích kabelech. Mostovka je tvořena segmenty o délce 3,0 m a celková délka mostovky je 105 m.

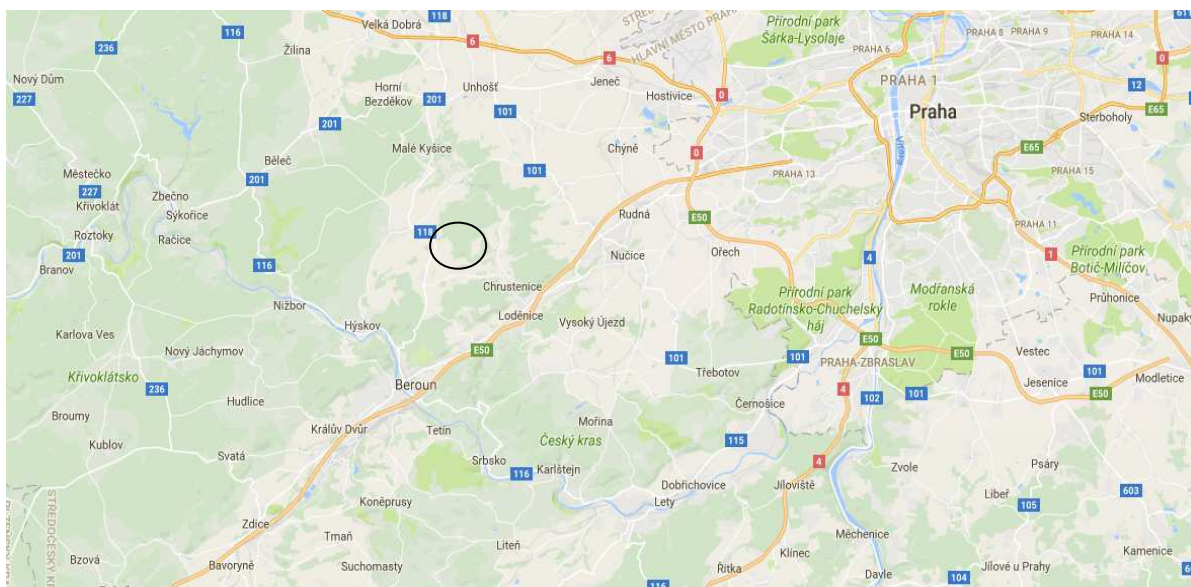
1.1 OBECNÉ INFORMACE

1.1.1 ÚČEL LÁVKY

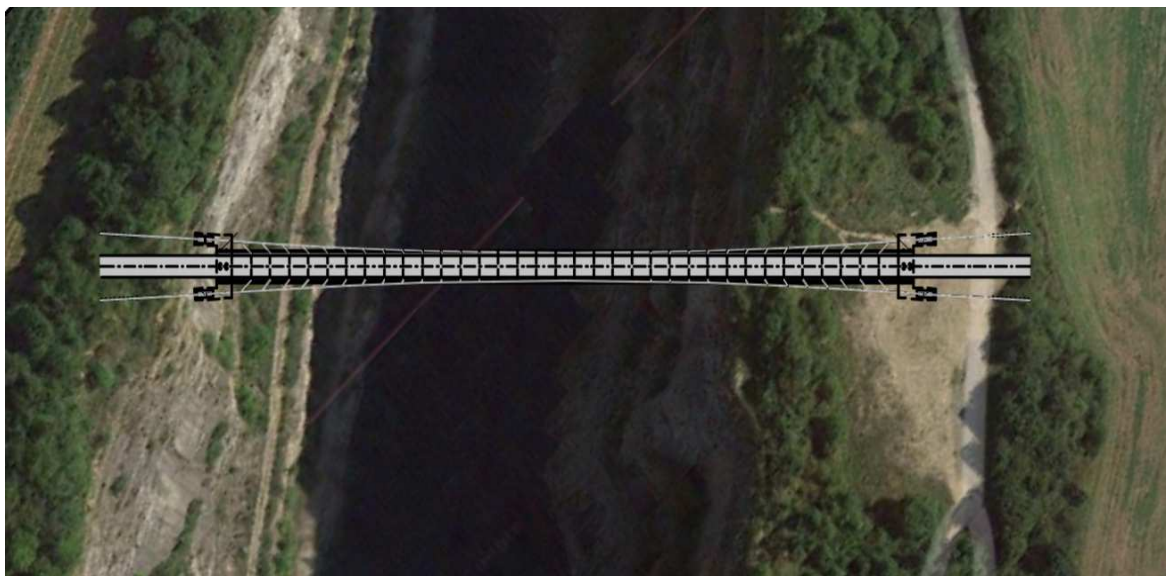
Účelem lávky je převedení turistické stezky z Mořiny do Bubovic přes hluboké údolí, ve kterém se nachází vodní plocha a turistická stezka. Lávka plynule navazuje na turistické stezky a přirozeně se začleňuje do krajiny.

1.1.2 SITUOVÁNÍ MOSTU

Lávka přemostňuje vodní plochu. Turistická stezka, která je převáděná lávkou, je v oblasti stavby v půdorysné i podélné přímé poloze. Pro kotevní blok 1, ve kterém jsou zakotvená visutá lana, je zvoleno staničení 0,000 000 km. Pilíř 2 se tedy nachází ve staničení 0,010 628 km, pilíř 3 ve staničení 0,124 238 km a kotevní blok 4 ve staničení 0,134 867 km.



Obrázek 1: Situace širších vztahů



Obrázek 2: Začlenění situace mostu do reálného prostředí

1.1.3 GEOLOGICKÉ PODMÍNKY LOKALITY MOSTU

Oblast, ve které se nachází navrhovaná mostní konstrukce, má hornatý charakter.

V blízkém okolí stavby se nachází zalesněné území s četnými loukami. V okolí se nenacházejí žádné významné stavby či inženýrské sítě, které by mohly ovlivnit průběh stavby.

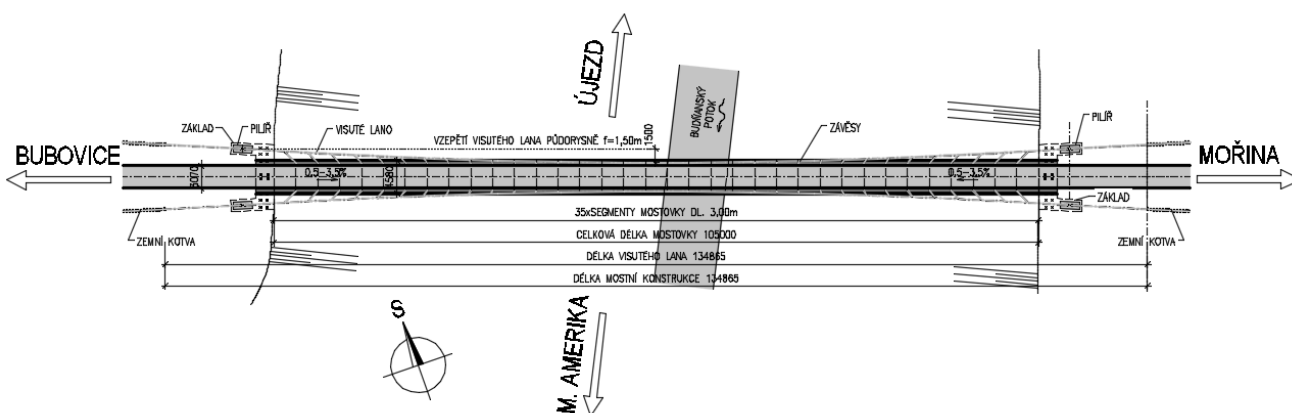
Podloží lokality tvoří skalnaté horniny tvořené vápencem a granitoidy se šterkem. Horninu lze zařadit do kategorie R2, tedy s vysokým stupněm pevnosti (udávaná pevnost je 50-150 MPa).

2 VARIANTY ŘEŠENÍ

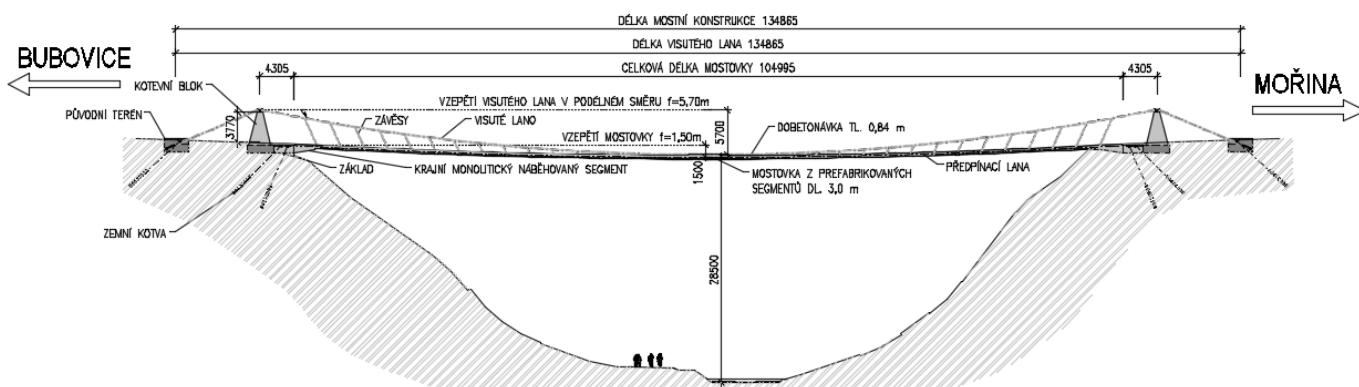
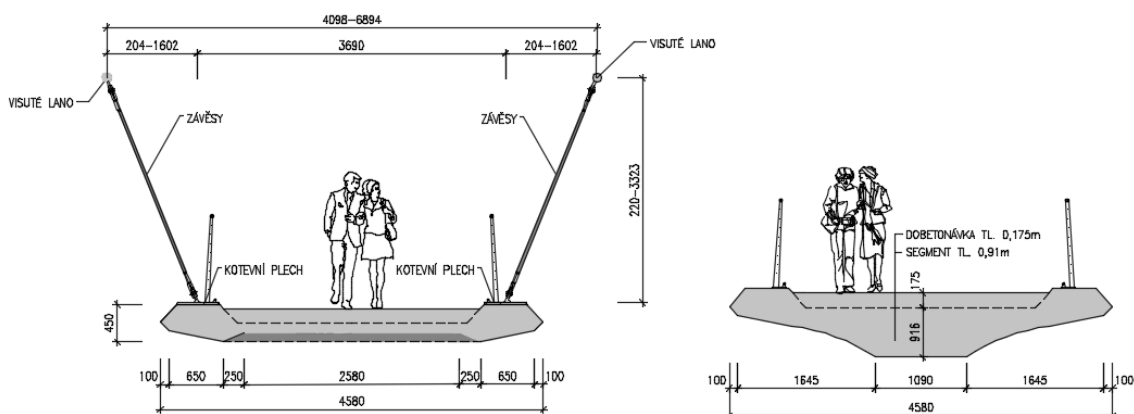
2.1 VARIANTA 1

První varianta lávky je tvořena předpjatým pásem s externími kabely. Lávka je zavěšená pomocí závěsů na visutá lana a je předepnuta finálními kabely pro zajištění tlakové rezervy pro nahodilé zatížení. Lávka plynule navazuje na okolní turistickou stezku a svou geometrii nijak výrazně nezasahuje do rázu krajiny.

Podrobněji je varianta vykreslena v příloze P2 – Varianta 1.



Obrázek 3: Půdorys varianty 1


Obrázek 4: Podélný řez varianty 1

Obrázek 5: Příčné řezy varianty 1

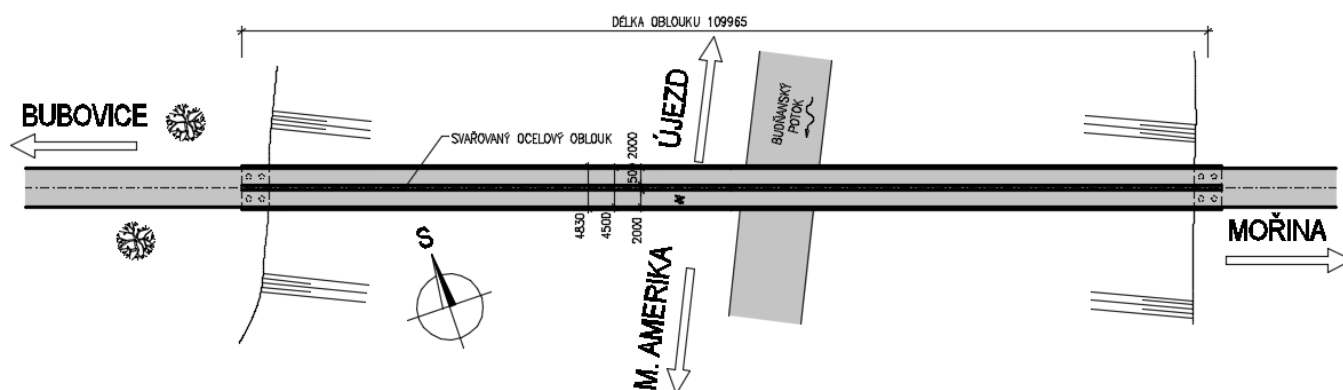
2.2 VARIANTA 2

Druhá varianta je lávka zavěšená na šikmém pylonu. Uspořádání závěsů je směrem k údolí semiharfové a na stranu od údolí rovnoběžné. Na druhé straně údolí je navržen jeden štíhlý pilíř podporující mostovku. Volná šířka konstrukce lávky je 3,3 m a lávka plynule navazuje na převáděné stezky. Podrobněji je varianta vykreslena v příloze P2 – Varianta 2.

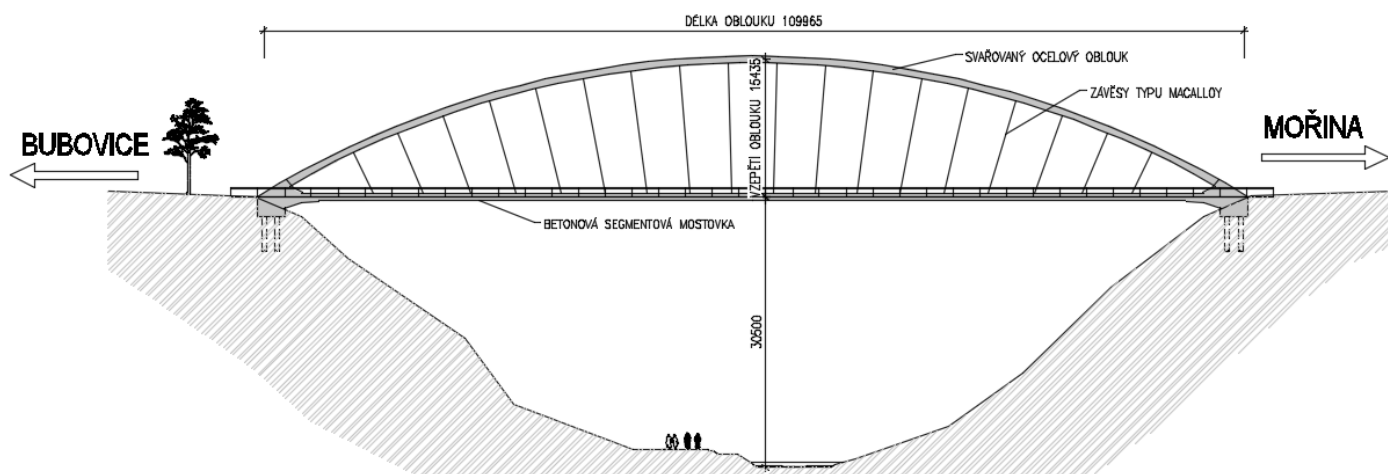


2.3 VARIANTA 3

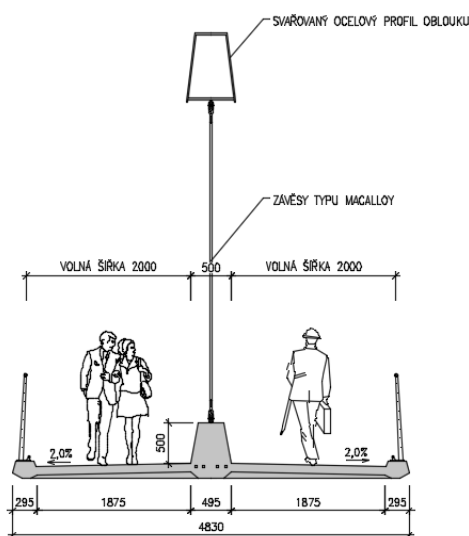
Poslední variantou je lávka tvořená ocelovým obloukem umístěným v podélné ose mostovky. Mostovka je předepnuta a tvoří tak táhlo v tomto konstrukčním systému. Jako založení je zvolena integrovaná opěra. Oblouk je tvořen svařenými plechy. Jednotlivé závěsy mají radiální uspořádání a sbíhají se ke středu mostovky. V příčném směru je lávka zavěšena na centrální nosník a z něj jsou navrženy konzoly do obou stran. Podrobněji je varianta vykreslena v příloze P2 – Varianta 3.



Obrázek 9: Půdorys varianty 3

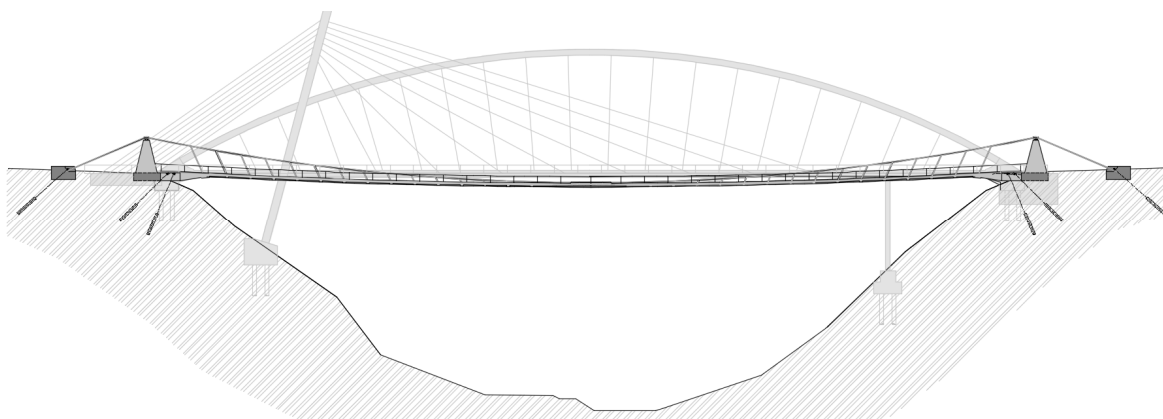


Obrázek 10: Podélný řez varianty 3


Obrázek 11: Příčný řez varianty 3

2.4 VÝBĚR VARIANTY

Rozhodujícím faktorem pro výběr varianty je tvarové řešení konstrukce a její začlenění do krajiny. Vlastní srovnání je patrné z obrázku, kdy se jako nejvhodnější varianta jeví 1. varianta, neboť nejlépe zapadá do rázu krajiny. Varianta 3, tedy lávka podporována obloukem také vypadá esteticky vhodně, ale přece jen vyšší oblouk by mohl nakonec vytvořit v krajině rušivý moment a byl by náročnější na údržbu. Lávka by neměla narušovat přirozený ráz krajiny a měla by být esteticky vhodná, finančně nenáročná a nenáročná na údržbu. Varianta 2 již nevypadá esteticky vhodně a její výstavba by byla jistě náročnější než vybraná varianta z důvodu založení pylonu do srázu údolí. Srovnání variant z estetického hlediska je zřejmé v příloze P1 – Srovnání variant. Ze všech zhodnocených faktorů byla vybrána varianta 1 pro podrobnější řešení.


Obrázek 12: Srovnání variant

3 VYBRANÁ VARIANTA – PŘEDPJATÝ PÁS



Obrázek 13: Vizualizace lávky

3.1 ZÁKLADNÍ ÚDAJE

Projektant:	Bc. Gabriela Tomisová
Stavba:	Přepjatý pás přes hluboké údolí
Lokalita:	Mořina
Kraj:	Středočeský
Obec:	Beroun
Typ lávky:	Přepjatý pás
Šikmost:	90°, kolmý
Délka segmentové mostovky:	105,0 m
Délka visutých lan:	113,0 m
Volná výška:	neomezená
Vzepětí segmentové mostovky:	1,5 m



Vzepětí visutých lan:	v podélném směru:	5,7 m
	půdorysně:	1,5 m
Volná šířka:		3,07 m

Lávka je tvořena betonovou předpjatou mostovkou délky 105 m, která je zavěšená na visutých lanech a je podporována montážními lany. Mostovka je tvořena z prefabrikovaných segmentů délky 3,0 m. Segment je dvoutrámového průřezu a je podporován příčníky. Segmenty jsou navrženy z betonu C50/60, a to z důvodu velikosti předpínací síly v mostovce a snahy dosáhnout co nejsubtilnější konstrukce. Délka mostovky je 105 m a je vedena v půdorysné přímé poloze. V podélném směru je vedena v parabolickém oblouku o vzepětí 1,5 m.

3.1.1 TECHNICKÉ PROVEDENÍ

Segmenty jsou zavěšeny pomocí závěsů na visutá lana a jsou podporovány montážními předpínacími lany. Během montáže je působení mezi segmenty kloubové, které je zajištěno čepy a ocelovými plechy. Po montáži se spáry mezi segmenty zabetonují a provede se dobetonávka segmentů. Tlakové rezervy je dosaženo dopnutím visutých lan a předepnutím mostovky finálními předpínacími lany.

Visuté kabely jsou vedeny ve dvou skloněných rovinách a jsou tvořeny 30 lany předpínacích lan Y1860-S7-15,7. Půdorysné vzepětí lan je 1,5 m a vzepětí v podélném směru je 5,7 m. Visutá lana jsou kotvená v kotevních stěnách. Vodorovnou složku předpětí ve visutých kabelech přenáší kabely vedené z kotevního bloku pod úhlem do země, kde jsou založeny na zemních kotvách. Kabely jsou vedeny v ocelových trubkách a jsou na ně pomocí ocelových plechů připevněny závěsy. Závěsy jsou tvořeny pomocí konstrukčních táhel Macalloy z oceli S 460.

Lávka je založena pomocí zemních kotev, které přenášejí jak svislé účinky vlastní tíhy, ostatního stálého zatížení a nahodilého zatížení, tak i vodorovné účinky předpětí. Pod pilířem, již není nutné navrhovat založení z důvodu dostatečně únosného skalnatého podloží.



3.1.2 NÁVRH PŘEDPĚTÍ

Vlastní tíha mostovky je vynášena pomocí montážních předpínacích lan a visutých lan. Po zmonolitnění spár dojde k dopnutí visutých lan a k předepnutí finálních lan vedených v mostovce. Díky nim lze dosáhnout požadované tlakové rezervy v mostovce po celou dobu její životnosti. Je navrženo celkem 60 montážních lan v mostovce a 30 lan v každém visutém laně. Finálních lan je navrženo 90 a jsou rozděleny do dvou 33 lanových kabelů v krajích segmentu a do dvou 12 lanových plochých kabelů v desce mostovky.

Napínání bude probíhat z obou stran. Předpínací jednotky jsou stabilizovaná sedmidrátová lana Y1860-S7-15,7.

Kotevní napětí v montážním stavu je u montážních a visutých lan sníženo z maximálního kotevního napětí, a to z důvodu nevyhovujícího posudku, respektive z důvodu dopínání visutých lan ve výchozím stavu. Montážní lana budou napnuta na kotevní napětí 1115 MPa, visutá lana v montážním stavu na 809 MPa, ve výchozím stavu budou dopnuta na 1115 MPa a finální lana budou napnuta na hodnotu 1394 MPa.

Krátkodobé i dlouhodobé ztráty jsou odhadnuty každé na 10%.

3.1.3 ODVODNĚNÍ

Odvodnění mostovky je zajištěno podélným spádem mostovky, který je po celé délce 0,5 - 3,5%. V příčném směru je spád navržen 1,0% do středu konstrukce. Spády zajišťují odvedení vody doprostřed mostovky, kde je navržen odvodňovač. Ten svádí vodu z mostovky pod most do údolí volným spádem.

3.1.4 ZALOŽENÍ STAVBY

Mostovka je podepřena montážními a visutými lany, která jsou kotvena do základu. Vodorovné složky předpětí i svislé složky vznikající stálým a nahodilým zatížením jsou přenášeny pomocí zemních kotev délky 9,0 m. Počet zemních kotev je volen tak, aby přenesl veškeré účinky zatížení, stejně tak je volena také jejich geometrie (sklonění od svislé polohy). Počet zemních kotev je odhadnut empiricky z hodnot únosnosti kotvy v dané

hornině. Geologický profil je uvažován jako skalnatý, avšak pro výpočet zemních kotev byl první metr hloubky horniny uvažován jako štěrkovitý. Ve štěrku je únosnost odhadnuta na 120 kN/m a ve skále 140 kN/m. Únosnost R jedné kotvy při její délce 9 m pak vychází z výpočtu $R = h_1 \cdot R_1 + h_2 \cdot R_2 = 1 \cdot 120 \cdot 10^3 + 8 \cdot 140 \cdot 10^3 = 1240$ kN. Z hodnot reakcí je pro založení mostovky navrženo 16 zemních kotev na každé straně mostovky a pro založení visutého lana 4 kotvy pod každým kotevním blokem.

3.2 FÁZE VÝSTAVBY

Podrobné vykreslení fází výstavby je v příloze P3 –1 Fáze výstavby.

- Fáze 1: Geodetické práce, přípravné práce, provedení výkopů.
- Fáze 2: Provedení základů, betonáž monolitického segmentu, betonáž kotevních opěr.
- Fáze 3: Umístění zemních kotev.
- Fáze 4: Osazení visutých lan a montážních lan.
- Fáze 5: Montáž segmentů symetricky od středu lávky. Segmenty jsou mezi sebou kloubově spojeny pomocí čepů kotevních plechů. Dále jsou segmenty zavěšeny na visutá lana prostřednictvím závěsů.
- Fáze 6: Zmonolitnění spár mezi segmenty, dobetonávka segmentů.
- Fáze 7: Předepnutí finálních předpínacích lan.
- Fáze 8: Osazení příslušenství lávky, dokončovací práce, uvedení do provozu.
- Fáze 9: Provoz lávky, působení nahodilého zatížení, tj. lidmi a teplotními účinky.

3.3 MATERIÁLY

3.3.1 BETON

Prefabrikované segmenty mostovky i samotná dobetonávka je navržena z betonu C50/60, pilíř je navržen z betonu C35/45. Maximální uvažovaná frakce kameniva je $d_g = 16$ mm. Materiálové charakteristiky použitého betonu jsou uvedeny v příloze P4 – Statický výpočet.

Na konstrukci lávky bude spotřebováno přibližně 190 m³ betonu. Tento objem zahrnuje jak beton použitý na segmenty, tak na dobetonávku.



3.3.2 BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ

Všechna betonářská výztuž použitá v konstrukci je třídy B550B. V nosné konstrukci jsou použity profily ϕ 6, 10, 14 a 20 mm. Pro zachování krycí vrstvy betonu a tedy správného uložení výztuže, jsou použity distančníky Feromax.

3.3.3 PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ

Část finálních předpínacích lan je tvořena z kanálků kruhového průřezu, část finálních a montážní lana jsou tvořena plochými kanálky, lana jsou tedy uspořádána do plochého průřezu. Tato lana jsou tvořena dle specifických požadavků přímo na míru. K předepnutí konstrukce byly použity předpínací lana Y 1860 S7 – 15,7. Každé lano je tvořeno 7 dráty. Pro zachování přesného trasování kanálku s výztuží budou použity distanční mřížky. Výkres předpínací výztuže se nachází v příloze P2.

3.4 MODEL LÁVKY V ANSYSU

3.4.1 STATICKÝ SYSTÉM

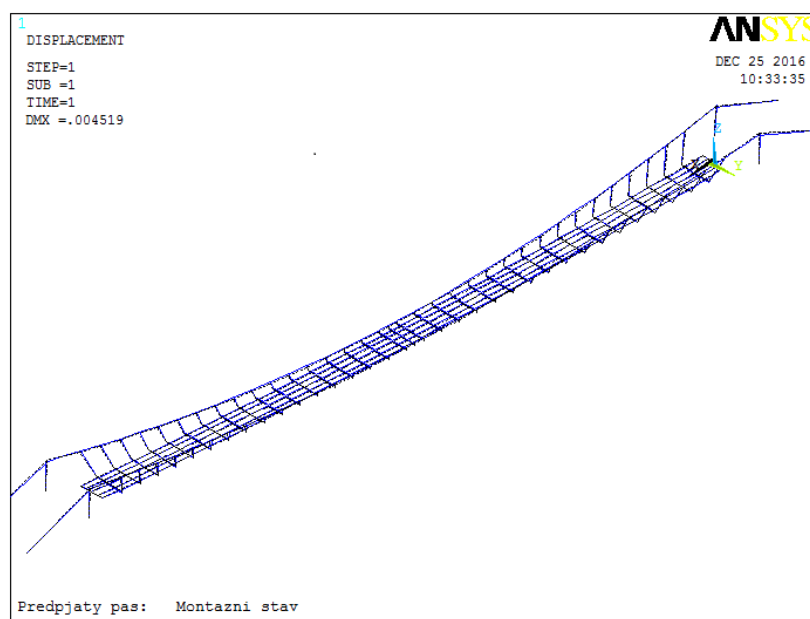
Hlavní nosný prvek tvoří visutá a montážní lana, která jsou kotvena v kotevních blocích a která vynášejí vlastní tíhu konstrukce. Jednotlivé segmenty jsou nasunuty na montážní lana pomocí montážního vozíku a jsou kloubově zavěšeny pomocí závěsů na visutá lana. První a poslední segment mostovky je monolitický, náběhový a je vytvořen zároveň s kotevním blokem, ve kterém jsou ukotvena montážní lana. V montážním stavu je spojení mezi jednotlivými segmenty kloubové. Lávka je tedy podepřena prostřednictvím visutých a montážních lan. Dodatečným zabetonováním segmentů a provedením dobetonávky segmentů se změní spojení mezi segmenty z kloubového na pevné. Po předepnutí mostovky finálními lany a instalaci příslušenství mostu je lávka uvedena do provozu a působí nahodilé zatížení.

3.4.2 MODEL KONSTRUKCE

Výpočetní model byl vytvořen ve výpočetním programu Ansys 14.0. Do programu jsou zadány jednotlivé prvky modelu, materiály, reálné charakteristiky a jednotlivé spojení

mezi segmenty. Geometrie je zadána jednotlivými body a ty jsou spojeny pomocí elementů. Každý element má přiřazen typ, materiál a reálnou charakteristiku. Celý model lávky obsahuje elementy mostovky, tuhých vazeb, visutá, montážní a finální lana a závěsy.

Model byl řešen nelineárně.



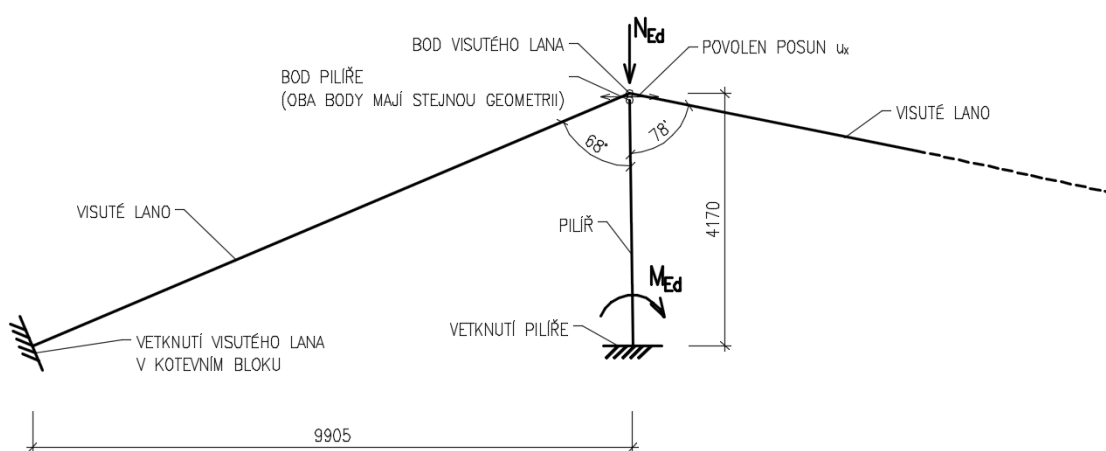
Obrázek 14: Model lávky v programu Ansys 14.0

3.4.2.1 Fáze modelu

Model konstrukce je uvažován v několika fázích. První fáze je montážní stav, ve kterém je hledána výchozí geometrie a reálné charakteristiky jednotlivých elementů. Spojení mezi segmenty je v této fázi modelováno jako kloubové, a to díky příkazu CP, který dovoluje povolit či zakázat posuny a rotace dvojice a více bodů v jednotlivých směrech. V této fázi je v modelu uvažováno s celkovou vlastní tíhou, plocha segmentu je uvažována i s dobetonávkou spár a dobetonávkou segmentů. Ve výpočtu je také uvažováno s vlastní tíhou žeber, avšak jejich plocha není uvažována. Je uvažována také vlastní tíha visutých a montážních lan a závěsů. Finální lana v této fázi ještě nepůsobí a jsou tedy „umrtvena“ pomocí příkazu ekill.

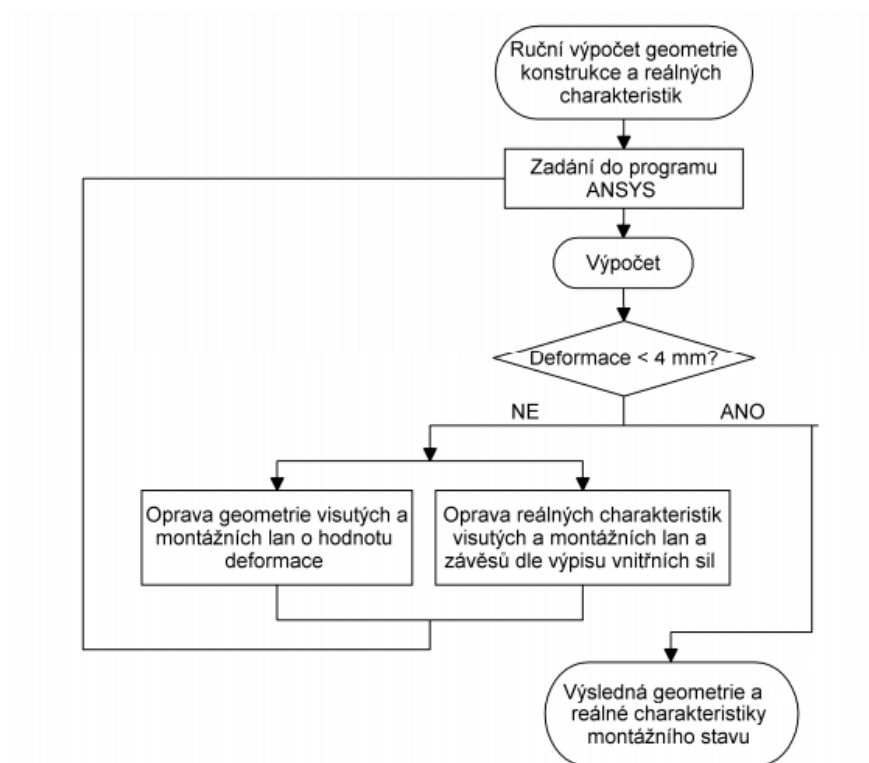
Dále je vymodelován pilíř, přes který jsou sedlem vedena visutá lana, která jsou kotvena v kotevních blocích. Mezi bodem visutého lana a horním bodem pilíře (body

se stejnou geometrií) je dovolen opět pomocí příkazu CP posun ve směru x. Visuté lano tedy může v sedle proklouznout. Geometrie pilíře je vyrovnána tak, aby se deformace ve vrchním bodě pilíře blížila nule, a tedy aby pilíř nebyl zatížen příliš velkým ohybovým momentem. K dosažení rovnováhy, a tedy zatížení pilíře svislou silou a malým ohybovým momentem, byly upravovány hodnoty přetvoření části visutého lana za pilířem. Tímto se docílilo deformace pilíře blížící se nule, neboť bylo docíleno rovnováhy sil v bodech pilíře a visutého lana.



Obrázek 15: Schéma filozofie působení pilíře

V této fázi byla také vyrovnána geometrie celé konstrukce, a to tak, aby výsledná odchylka ve výpočetním programu byla maximálně 4 mm od uvažované geometrie. Vyrovnání bylo provedeno pomocí iterace, což je proces, při kterém jsou upravovány souřadnice bodů visutých a montážních lan a také jejich reálné charakteristiky. Jsou také upravovány reálné charakteristiky závěsů. Výpočet souřadnic bodů je v prvním kroku proveden ručním výpočtem. Visutá lana jsou uvažována v prvním kroku ve dvou skloněných parabolách ve směru osy z a osy y, montážní lana jsou vedena v parabole ve směru osy y. Takto navržená konstrukce je zadána do programu Ansys a je spuštěn výpočet. Z výsledků je zjištěna deformace celé konstrukce i jednotlivých bodů elementů. O tuto deformaci se upraví geometrie visutých a montážních lan. Dále jsou vypsány vnitřní síly a dle nich se upraví reálné charakteristiky, tj. přetvoření visutých a montážních lan a také závěsů. Reálné charakteristiky jsou zadávány u předpínacích lan pomocí plochy lana a přetvoření. Tento krok se opakuje tak dlouho, dokud výsledná geometrie není menší než 4 mm.



Obrázek 16: Schéma iterace

Druhá fáze modelu, t_a , nastává po vytvoření dobetonávky, předeptnutí finálních lan a dopnutí visutých lan. V této fázi působí segmenty již pevně a ne kloubově, což je modelováno opět pomocí příkazu CP, ale nepůsobí ještě nahodilé zatížení.

Ve třetí fázi t_0 je konstrukce uvedena do provozu a působí ostatní stálé i nahodilé zatížení. Při výpočtu každého zatěžovacího stavu jsou do programu Ansys zadány postupně všechny fáze popsané výše. V této fázi jsou uvažovány pouze krátkodobé ztráty.

Ve čtvrté fázi t_∞ je uvažováno také s dlouhodobými ztrátami a působí také nahodilé zatížení. Tato fáze je uvažována na konci životnosti konstrukce, tedy po 100 letech.

3.4.2.2 Prvky modelu

Lávka je modelována z jednotlivých elementů. Každému elementu je přiřazen materiál, reálná charakteristika a typ prvku. Typ prvku je dělen na jeho působení, tj. zda přenáší tah, tlak i ohyb (prvek beam188 a prvek beam44), nebo zda přenáší pouze tah a tlak (prvek link8).

Mostovka

Mostovka je vedena v parabolickém oblouku se vzepětím $f=1,5$ m délky 105 m. Podélný sklon je proměnný od 0,5% do 3,5%. Je tedy splněna podmínka pro maximální a minimální podélný sklon, které jsou $s_{\min} = 0,5\%$ a $s_{\max} = 8\%$. Sklony jsou omezené z důvodu možnosti použití lávky imobilními občany a z důvodu odvodnění mostovky.

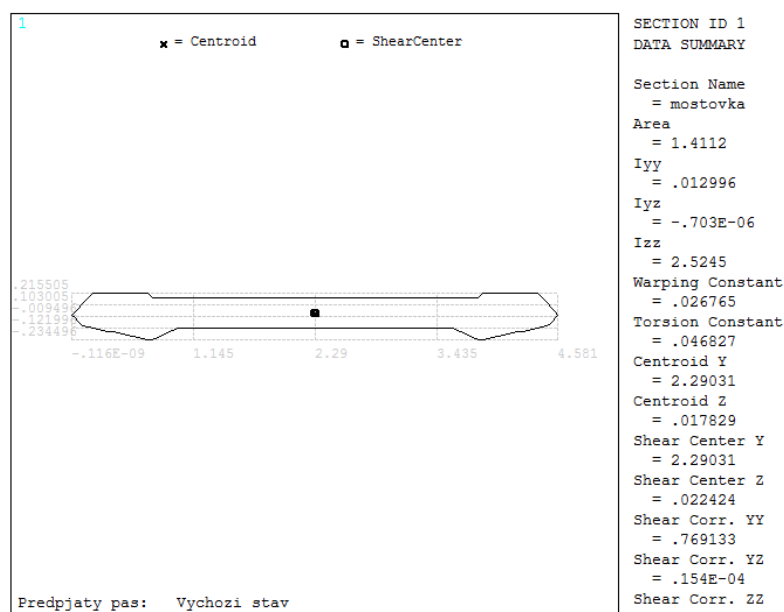
Mostovka je tvořena jednotlivými segmenty délky 3,0 m. Její geometrie je zadána v ose mostovky, a to vždy po 0,75 m. Z koncových bodů segmentu jsou vedeny tuhé vazby pro možnosti připojení závěsů k mostovce. Výšková poloha mostovky je vypočítána z vlastností paraboly.

Mostovka je vytvořena pomocí prvku beam188, který umožňuje vykreslení napětí po výšce průřezu. Prvek beam188 přenáší tah, tlak i ohyb. Tento prvek má 6 stupňů volnosti v každém uzlu, tedy posun ve směru osy x, y a z a rotaci kolem osy x, y a z.

Dále je do programu zadán materiál mostovky:

modul pružnosti	$E = 37 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,15$

Reálné charakteristiky jsou zřejmé z následujícího obrázku. První segment mostovky je navržen monolitický, náběhový.



Obrázek 17: Reálné charakteristiky segmentu mostovky

Tuhé vazby

Tuhé vazby jsou modelovány pro spojení bodů těžiště mostovky s body těžiště předpínacích lan, dále pak pro modelování vazby k závěsům. Jsou modelovány po vzdálenostech 3 m a začínají v prvním bodě mostovky.

Tuhé vazby jsou modelovány pomocí prvku beam44, což je jednoosý prvek, který přenáší tah, tlak i ohyb.

Dále je do programu zadán materiál tuhých vazeb:

modul pružnosti	$E = 200 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 0 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,3$

Reálné charakteristiky odpovídají kvádru o délce strany 2 m:

průřezová plocha je tedy $4,0 \text{ m}^2$.

plošný moment setrvačnosti k hlavní centrální ose y $I_{yy} = 1,3333 \text{ m}^4$

plošný moment setrvačnosti k hlavní centrální ose z $I_{zz} = 1,3333 \text{ m}^4$

tloušťka podél osy y $T_{ky} = 1,0 \text{ m}$

tloušťka podél osy z $T_{kz} = 1,0 \text{ m}$.

Předpínací lana

Geometrie předpínacích lan je tvořena parabolickým obloukem a jednotlivé body lan jsou pootočený kolem osy y z důvodu spojení s body mostovky tak, aby toto spojení lépe odpovídalo reálné konstrukci. Body předpínacích lan mají stejné souřadnice jako body tuhých vazeb k lanům. S těmito body jsou spojeny příkazem CP. Předpětí je modelováno v těžišti předpínacích lan, jsou tedy zadány 2 kabely pro montážní lana a 2 kabely pro finální lana. Plochy odpovídají daným kabelům.

Lana jsou modelována pomocí prvku link8, který přenáší pouze tah a tlak. Tento prvek má 3 stupně volnosti, tedy posun ve směru osy x, y a z.

Dále je do programu zadán materiál předpínacích lan:

modul pružnosti	$E = 195 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,3$

Reálné charakteristiky jsou zadány pro každé lano zvlášť. Předpínací lana tvoří nesoudržná lana z předpínací oceli Y1860 S7-15,7. Reálné charakteristiky jsou zadány pomocí plochy a přetvoření, ze kterého vyplývá předpínací síla. U finálních lan je navržena tak, aby vznikala v mostovce tlaková rezerva pro nahodilé zatížení, pro montážní lana pak tak, aby vynášela vlastní tíhu do požadované geometrie. Hodnoty přetvoření montážních lan byly upraveny iteračně a to tak, aby geometrie v modelu odpovídala uvažované geometrii. Maximální odchylka jsou 4 mm. Každý úsek montážních lan má přiřazenou svou reálnou charakteristiku. V prvním kroku bylo zadáno v každém úseku stejné přetvoření, v dalších krocích se síla, resp. přetvoření upravilo dle získaných hodnot z programu Ansys. Pro posouzení mezního stavu únosnosti i mezního stavu použitelnosti byly v jednotlivých fázích uvažovány krátkodobé a dlouhodobé ztráty.

Závěsy

Závěsy jsou tvořeny konstrukčním systémem táhel Macalloy M24 z nerezové oceli S460. Závěsy jsou spojeny kloubově ke kotevním plechům na ocelové trubce visutých lan a ke kotevním plechům připojeným k mostovce. Spodní body závěsů jsou uvažovány

po vzdálenostech 3 m a jsou spojeny s tuhými vazbami mostovky. Souřadnice vrchních bodů jsou vypočteny dle geometrie visutého kabelu. Střední segment není spojen s visutými lany pomocí závěsů, ale je spojen s visutým lanem po celé své délce.

Závěsy jsou modelovány pomocí prvku link8, který přenáší pouze tah a tlak. Tento prvek má 3 stupně volnosti, tedy posun ve směru osy x, y a z.

Dále je do programu zadán materiál závěsů:

modul pružnosti	$E = 190 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,3$

Reálné charakteristiky jsou stejně jako u předpínacích lan zadány plochou a přetvořením. Přetvoření bylo třeba dopočítat iteračně. Každý závěs má jinou délku díky skloněným visutým lanům, každý závěs tedy svírá s globálními souřadnicemi jiný úhel.

Visutá lana

Visutá lana jsou tvořena předpínacími lany Y1860 S7-15,7. Jak již bylo uvedeno výše, jsou vedena ve dvou skloněných rovinách a jejich délka je 113 m. Začíná, respektive končí 4 m před a za posledním segmentem mostovky. Visutá lana jsou přes opěry kotvena v kotevních blocích, půdorysná délka těchto lan pro kotvení je 10,6 m. Kabely jsou vedeny v ocelových trubkách, ve kterých jsou zainjektovány. Na tyto ocelové trubky jsou navařeny kotevní plechy, sloužící k napojení závěsů. Geometrie kabelů vychází z vlastností paraboly 2°, parabola je vedena jak ve směru osy y, tak ve směru osy z. Vzepětí visutých lan je v podélném směru 5,7 m a v půdoryse 1,5 m. Geometrie jednotlivých bodů lana je zpřesněna iteračně. Uprostřed rozpětí jsou visutá lana pevně spojena se segmentem mostovky z důvodu dosažení vyšší tuhosti konstrukce. Toto spojení je modelováno pomocí příkazu CP.

Visutá lana jsou modelována pomocí prvku link8, který přenáší pouze tah a tlak. Tento prvek má 3 stupně volnosti, tedy posun ve směru osy x, y a z.



Dále je do programu zadán materiál visutých lan:

modul pružnosti	$E = 195 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 7850 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,3.$

Reálné charakteristiky jsou zadány pro úseky lana zvlášť. Lano je děleno na úseky dle závěsů. Jsou zadány pomocí plochy a přetvoření, které bylo vypočítáno ručně a zpřesněno iteračně. Každý úsek visutého lana má přiřazenou svou reálnou charakteristiku, v dalších krocích se síla, resp. přetvoření upravilo ze získaných hodnot z programu. Pro posouzení mezního stavu únosnosti i mezního stavu použitelnosti byly v jednotlivých fázích uvažovány krátkodobé a dlouhodobé ztráty.

Pilíř

Pilíř, přes který jsou vedena sedlem visutá lana, je modelován jako prvek beam44. Je uvažován jako prvek, který je zatížen hodnotou svislé složky od visutých lan a také ohybovým momentem, který vzniká v podélném i příčném směru. Pilíř je podepřen jako konzola.

Dále je do programu zadán materiál pilíře:

modul pružnosti	$E = 34 \text{ GPa}$
součinitel teplotní roztažnosti	$\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
objemová hmotnost	$\gamma = 26 \text{ kN/m}^3$
Poissonův součinitel	$\nu = 0,15$

Reálné charakteristiky odpovídají geometrii pilíře. Prvek je rozdělen na 3 části o různých mocnostech.

3.4.3 ZATÍŽENÍ A KOMBINACE

3.4.3.1 Zatížení

Vlastní tíha

Mostovka, visuté kabely, závěsy, montážní i finální předpínací lana jsou vygenerovány programem Ansys ze zadané průřezové plochy a objemové hmotnosti.

Ostatní stálé

Zábradlí je uvažováno na celou délku konstrukce.

$$g_1 = 1,0 \text{ kN/m}$$

Nahodilé (lidé)

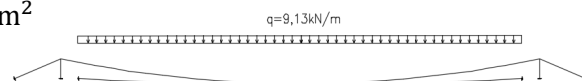
Jednotlivé zatěžovací stavy jsou uvažovány na konstrukci ve výchozím stavu a čase t_0 a t_∞ . Zatížení tedy působí na již zmonolitněnou konstrukci.

$$\text{Podmínka: } 2,5 \text{ kN/m}^2 \leq q_{fk} \leq 5,0 \text{ kN/m}^2$$

Plné

$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L+30} = 2,0 + \frac{120}{105+30} = 2,89 \text{ kN/m}^2$$

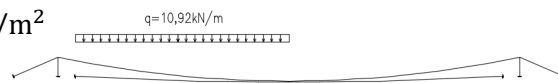
$$q_k = q_{fk} \cdot b = 2,89 \cdot 3,16 = 9,13 \text{ kN/m}$$



Polovina

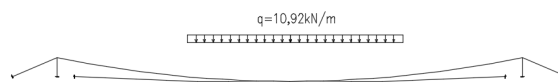
$$q_{fk} = 2,0 + \frac{120}{L+30} = 2,0 + \frac{120}{52,5+30} = 3,45 \text{ kN/m}^2$$

$$q_k = q_{fk} \cdot b = 3,45 \cdot 3,16 = 10,92 \text{ kN/m}$$



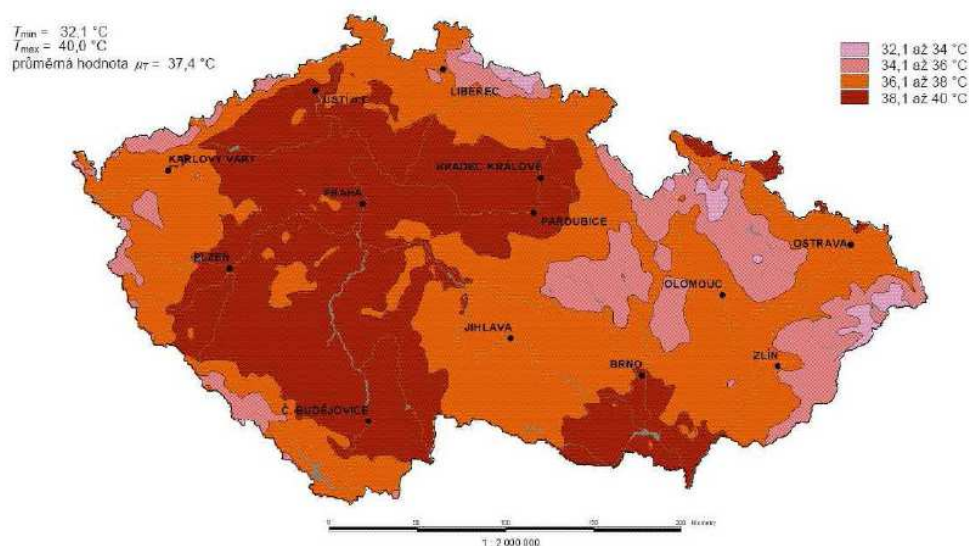
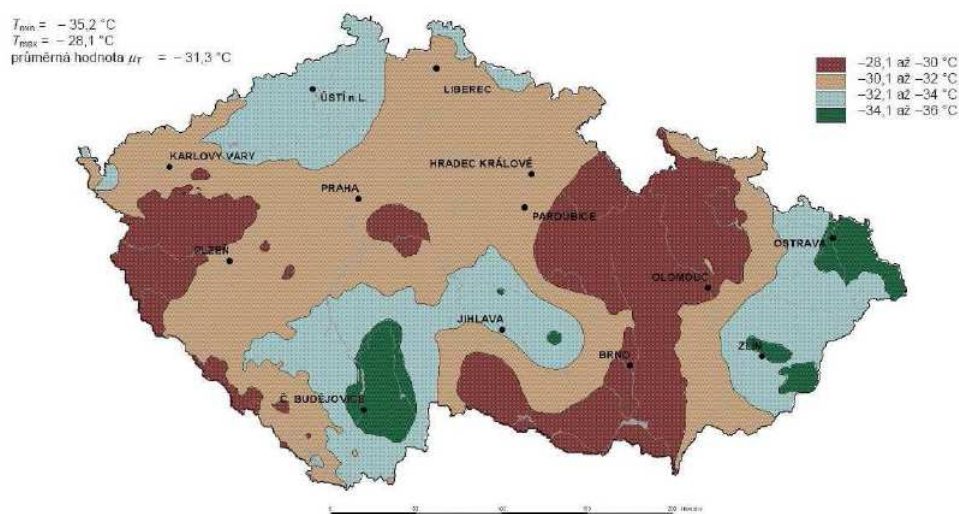
Střed

$$q_k = q_{fk} \cdot b = 3,45 \cdot 3,16 = 10,92 \text{ kN/m}$$



Teplota

Zatížení teplotou je uvažováno ve stavu rovnoměrného oteplení a ochlazení. Výpočet hodnot změn teploty je proveden na základě map teplot ve stínu, které jsou převzaty z ČSN EN 1991-1-1.


Obrázek 18: Teplotní mapa ČR

Obrázek 19: Teplotní mapa ČR

Minimální teplota vzduchu v místě stavby objektu ve stínu: $T_{\min} = -32^{\circ}\text{C}$.

Maximální teplota vzduchu v místě stavby objektu ve stínu: $T_{\max} = +38^{\circ}\text{C}$.

Minimální a maximální rovnoměrná složka teploty:

$$T_{e,\min} = T_{\min} + 8^{\circ}\text{C} = -32 + 8 = -24^{\circ}\text{C}$$

$$T_{e,\max} = T_{\max} + 1,5^{\circ}\text{C} = +38 + 1,5 = +39,5^{\circ}\text{C}$$

Rozsah rovnoměrné složky teploty mostu: výchozí teplota mostu $T_0 = 10^{\circ}\text{C}$.

Zkrácení: $\Delta T_{N,\text{CON}} = T_0 - T_{e,\min} = 10 - (-24) = -34^{\circ}\text{C}$.

Prodloužení: $\Delta T_{N,EXP} = T_{e,max} - T_0 = +38 - 10 = +28^\circ\text{C}$.

Celkový rozsah rovnoměrných teplot: $\Delta T_N = T_{e,max} - T_{e,min} = +28 - (-34) = +62^\circ\text{C}$.

3.4.3.2 Kombinace

Mezní stav únosnosti

Pro mezní stav únosnosti byly uvažovány kombinace 6.10a a 6.10b. Hodnoty vnitřních sil pro dimenzování byly pro MSÚ získány z jednotlivých zatěžovacích stavů a byly ručně zkombinovány.

Návrhová situace	Stálá zatížení G_k	Předpětí P	Proměnná zatížení Q_k		
			Hlavní	Nejúčinnější	Ostatní
6.10	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_P \cdot P$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,i}$	—	$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
6.10a	$\gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_P \cdot P$	—	$\gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
6.10b	$\xi \cdot \gamma_G \cdot G_k$	$\gamma_P \cdot P$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,i}$	—	$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$

Mezní stav použitelnosti

Mezní stav použitelnosti byl řešen v charakteristických, častých a kvazistálých kombinacích. Kombinace byly pro mezní stav použitelnosti sestaveny v programu Ansys dle uvedených součinitelů. U nahodilých zatížení byly odpovídajícími součiniteli násobeny hodnoty jednotlivých zatěžovacích stavů. Z programu Ansys byly získány hodnoty vnitřních sil a průběhy napětí po výšce průřezu v charakteristických řezech.

Kombinace zatížení

Kombinace	Stálá zatížení G_k	Předpětí P	Proměnná zatížení Q_k	
			Hlavní	Ostatní
Charakteristická	G_k	P	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
Častá	G_k	P	$\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
Kvazistálá	G_k	P	$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

Součinitelé ψ pro mosty pozemních komunikací

Zatížení	Značka	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Dopravou	chodci a cyklisti	0,40	0,40	0
Teplotou	T_k	0,60	0,60	0,50

3.4.4 POSOUZENÍ MODELU

3.4.4.1 MSÚ

Mezní stav únosnosti je řešen v čase t_{∞} pro mostovku a také v jednotlivých časech $t_{\text{montážní}}$, t_0 a t_{∞} pro montážní a visutá lana. Pro mezní stav únosnosti byly z programu Ansys získány hodnoty vnitřních sil z jednotlivých zatěžovacích stavů, které byly ručně zkombinovány a na nejneprůzračnější kombinaci posouzeny. Všechny posudky jsou podrobně uvedeny v příloze P4 – Statický výpočet, zde jsou uvedeny pouze rozhodující posudky.

- **MONTÁŽNÍ LANA**

Montážní lana jsou posouzena na tah a jsou nejvíce namáhána v čase $t_{\text{montážní}}$.

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Ed} = 6777 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 7380 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- **VISUTÁ LANA**

Visutá lana jsou posouzena na tah a jsou nejvíce namáhána v čase t_0 .

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Ed} = 6250 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 7380 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- **ZÁVĚSY**

Závěsy jsou posouzeny na tah a jsou nejvíce namáhána v čase t_0 .

$$N_{Ed} \leq N_{Rd}$$

$$N_{Ed} = 137 \text{ kN} \leq N_{Rd} = 283 \text{ kN} \quad \text{VYHOVUJE}$$

- **MOSTOVKA - OHYB**

Mostovka je v podélném směru předepnuta nesoudržnou předpínací výztuží. Pro nesoudržnou předpínací výztuž je hodnota přetvoření předpínací výztuže rozdílná od přetvoření betonu $\epsilon_c \neq \epsilon_p$. Přírůstek napětí od účinného předpětí do napětí v mezním stavu únosnosti lze předpokládat hodnotou $\Delta\sigma_{p,ULS} = 100 \text{ MPa}$ dle ČSN 1992-1-1. Posudek byl proveden s uvažováním přírůstku napětí a pro kontrolu také i bez tohoto přírůstku. Podrobný výpočet je uveden v příloze P4 – Statický výpočet. Byly vypracovány dva posudky – pro tažená horní a dolní vlákna.

Tažená spodní vlákna

$$M_{Ed} = 1956 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 6948 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 1956 \text{ kNm} \leq M_{Rd} = 2202 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

Tažená horní vlákna

$$M_{Ed} = 169 \text{ kNm}$$

$$N_{Ed} = 4248 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 169 \text{ kNm} \leq M_{Rd} = 763 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

• **MOSTOVKA – POSOUVAJÍCÍ SÍLA**

Nejdříve je rozhodnuto o vzniku trhlin. V místě monolitického segmentu trhliny vzniknou, ve zbylé části mostovky trhliny nevzniknou, lze tedy tuto část mostovky posoudit dle teorie pružnosti, viz příloha P4 – Statický výpočet.

Monolitický segment:

$$V_{Ed} = 448 \text{ kN} \leq V_{Rd,c} = 507 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

Mostovka:

$$V_{Ed} = 55 \text{ kN} \leq V_{Rd,s,min} = 131 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

• **PILÍŘ**

Pilíř je posouzen pomocí interakčního diagramu na namáhání normálovou silou a ohybovým momentem. Pilíř na dané zatížení vyhoví.

Mostovka i další nosné části vyhoví na mezní stav únosnosti v časech t_0 a t_∞ .

3.4.4.2 MSP

Pro mezní stav použitelnosti byly vytvořeny kombinace přímo v programu Ansys a byly získány přímo hodnoty napětí po výšce průřezu. Pro kontrolu byly také zjištěny hodnoty vnitřních sil a hodnoty napětí byly ručně spočítány a srovnány. Odchylka je v řádu procent, lze tedy prohlásit výsledky napětí z Ansysu za správně získané. Dále byla posouzena finální lana na omezení napětí.

Mezní stav použitelnosti je posouzen ve výchozím stavu v čase t_0 a v čase t_∞ v charakteristické, časté a kvazistálé kombinaci. Všechny posudky jsou uvedeny v příloze P4 – Statický výpočet.

- FINÁLNÍ LANA**

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{p,\max}$$

$$\sigma_{\max} = 1437 \text{ MPa} \leq \sigma_{p,\max} = 1476 \text{ MPa}$$

VYHOVUJE

- MOSTOVKA**

Mostovka je posouzena na omezení napětí v betonu a na posudek vzniku trhlin.

Tahové trhliny

$$\sigma_c \leq f_{ctm} = 4,1 \text{ MPa}$$

Kvazistálá kombinace

$$|\sigma_c| \leq 0,45 \cdot f_{ck} = 0,45 \cdot 50 = 22,5 \text{ MPa}$$

Častá kombinace

$$|\sigma_c| \leq 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ MPa}$$

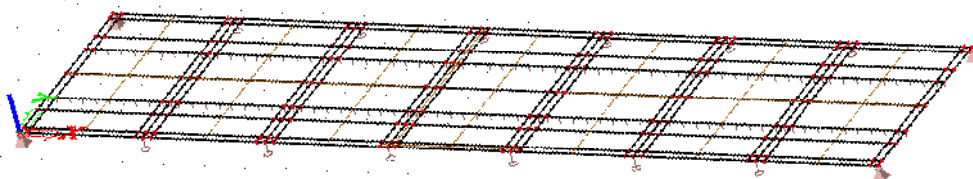
Charakteristická kombinace

$$|\sigma_c| \leq 0,6 \cdot f_{ck} = 0,6 \cdot 50 = 30 \text{ MPa}$$

Mostovka vyhověla na mezní stav použitelnosti v časech t_0 a t_∞ .

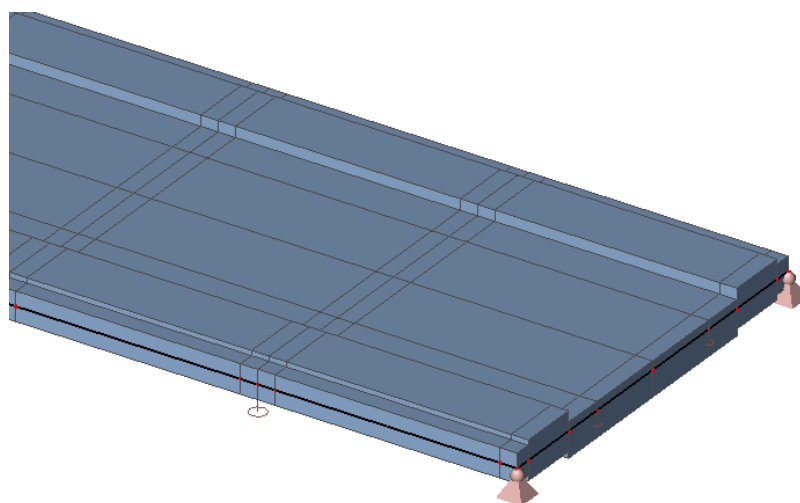
3.5 MODEL V PROGRAMU SCIA ENGINEER

Lávka byla vymodelována také v programu Scia Engineer 15.1, a to pro její posouzení v příčném směru. V příčném směru je lávka nepředepnutá, je tedy řešena jako železobeton. Pro modelování příčného směru bylo vybráno pouze několik segmentů, a ty byly namodelovány a posouzeny ve dvou fázích – montážní stav a t_∞ . Lávka byla v příčném směru posouzena na mezní stav únosnosti.



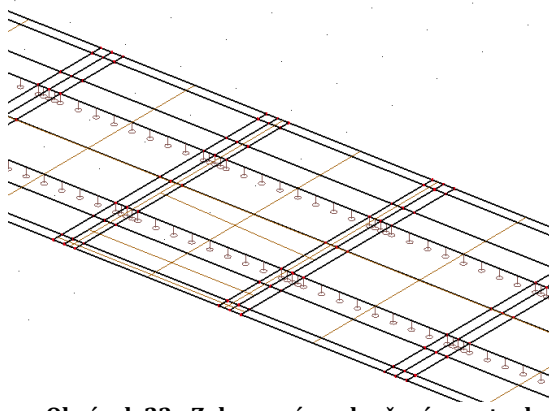
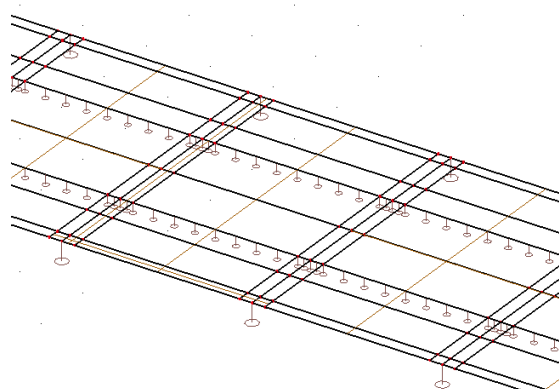
Obrázek 20: Axonometrie modelu mostovky v programu Scia Engineer 15.1




Obrázek 21: Detail modelu mostovky v programu Scia Engineer

3.5.1 POPIS MODELU

Konstrukce je modelována jako obecná, beton C50/60 je zvolen jako materiál segmentů. Příčný řez je sestaven z několika desek různých mocností pro co nejpřesnější vystižení skutečné geometrie. Model byl uvažován ve dvou fázích – v montážním stavu, kdy je mostovka podepřena pouze montážními lany, která jsou modelovány jako liniová podpora, a v čase t_{∞} , kdy je mostovka podepřena jak montážními lany, tak je i zavěšena na visutá lana prostřednictvím závěsů. Toto podepření je modelováno jako prosté podepření v místě závěsů. V tomto čase také na lávku již působí ostatní stálé zatížení i nahodilé zatížení.


Obrázek 23: Zobrazení podepření mostovky v čase $t_{montážní}$

Obrázek 22: Zobrazení podepření mostovky v časech t_0 a t_{∞}

3.5.2 ZATÍŽENÍ A KOMBINACE

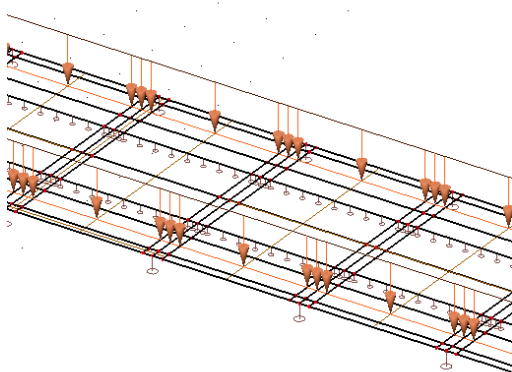
3.5.2.1 Zatížení

Vlastní tíha

Vlastní tíha je díky různé mocnosti desek generována automaticky v programu Scia Engineer 15.1.

Ostatní stálé

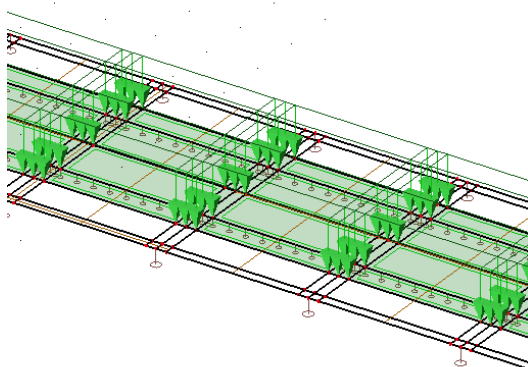
Ostatní stálé zatížení zahrnuje příslušenství lávky, tedy zábradlí. Zábradlí je uvažováno jako spojitě liniové zatížení $0,5\text{kN/m}$ na pravé i levé straně segmentu.



Obrázek 24: Zatížení ostatním stálým zatížením

Nahodilé

Zatížení lidmi je zadáno jako rovnoměrné plošné zatížení s hodnotou 5kN/m^2 .



Obrázek 25: Zatížení nahodilým zatížením

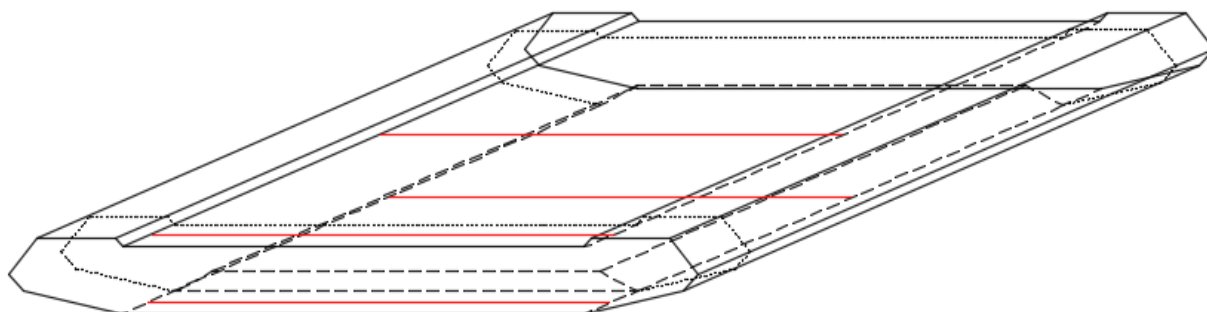
3.5.2.2 Kombinace

Pro mezní stav únosnosti byly vytvořeny kombinace dle rovnice 6.10.

$$6.10: \quad \Sigma \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \Sigma \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

3.5.3 POSOUZENÍ MODELU

Mostovka byla v příčném směru posouzena na nalezené extrémy ve 4 místech.



Obrázek 26: Schéma posuzovaných oblastí mostovky v příčném směru

3.5.3.1 Místo příčnicku – ohybový moment m_{yD+}

$$M_{Rd} = 49 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 16,4 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

3.5.3.2 Místo příčnicku – ohybový moment m_{yD-}

$$M_{Rd} = 16,4 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 4,04 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

3.5.3.3 Místo desky m_{yD+}

$$M_{Rd} = 51 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 22 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

3.5.3.4 Místo desky m_{yD-}

$$M_{Rd} = 51 \text{ kNm} \geq M_{Ed} = 11 \text{ kNm}$$

VYHOVUJE

3.5.3.5 POSOUVAJÍCÍ SÍLA

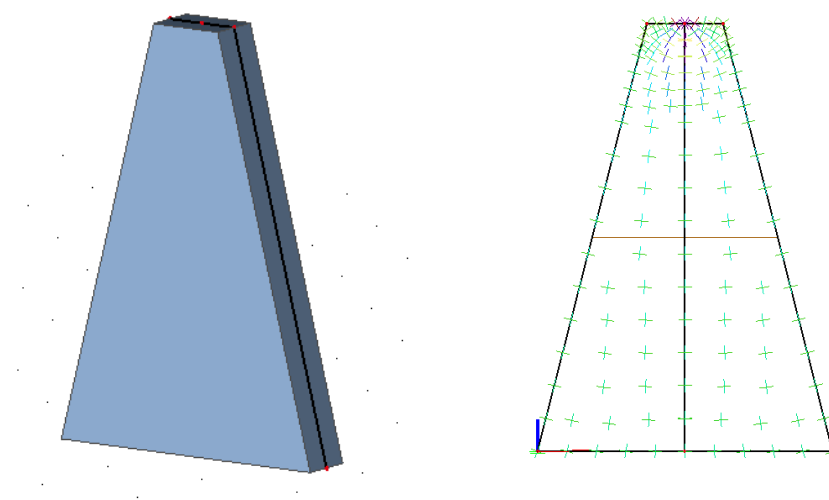
$$V_{Rd,c,min} = 68 \text{ kN} \geq V_{Ed} = 55 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

Mostovka vyhoví v příčném směru na mezní stav únosnosti v obou fázích.

3.5.4 PILÍŘ

V programu Scia Engineer 15.1 byl také namodelován pilíř, a to jako deska pro posouzení lokálních účinků zatížení. Deska byla zatížena silou, která odpovídá únosnosti visutých lan. Pod touto silou vznikají napětí, která je třeba posoudit: namáhání betonu soustředěným tlakem pod silou (otlačení betonu), posouzení roztržení oblasti štěpných sil (roznášecí oblast) a posouzení roztržení líce prvku.



- ROZTRŽENÍ OBLASTI ŠTĚPNÝCH SIL**

$$F_{Rd} = 1052 \text{ kN} \geq F_{Ed} = 968 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

- NAMÁHÁNÍ BETONU SOUSTŘEDĚNÝM TLAKEM**

$$F_{Rd} = 26014 \text{ kN} \geq F_{Ed} = 3799 \text{ kN}$$

VYHOVUJE

Pilíř vyhoví na mezní stav únosnosti.

4 MODÁLNÍ ANALÝZA

Modální analýza byla vyhodnocena na konstrukci ve výchozím stavu, tj. při zatížení pouze vlastní tíhou a bez zatížení ostatního stálého (zábradlí) a nahodilého (lidé). Sledováno bylo prvních 20 vlastních tvarů visuté lávky.

Porovnány byly hodnoty frekvence 1. podélného vlastního tvaru s doporučenou hodnotou. Tato frekvence je $f_{p1} = 0,743$ Hz a nemá být blízká hodnotě 2 Hz, což vyhovuje.

Dále byl sledován podíl 1. podélného vlastního tvaru s 1. torzním tvarem. Frekvence 1. podélného vlastního tvaru je $f_{p1} = 0,743$ Hz a 1. torzního je $f_{t1} = 1,913$ Hz. Jejich podíl je $f = 0,388$ Hz, což je hodnota různá od 2,5 Hz, tedy vyhovuje.

Obrázky vlastních tvarů a frekvencí jsou uvedeny v příloze P4 – Výstupy z programů.

4.1 HARMONICKÁ ODEZVA

Z vlastních frekvencí byly zjištěny 4 body v podélném směru, ve kterých je předpokládána největší amplituda v daném vlastním tvaru. V těchto bodech může dojít k rezonanci. Tento stav je sledován pomocí svislé budící síly F , která je situována v daných bodech.

V podélném směru se jedná o bod v polovině rozpětí konstrukce a dále ve třetině a ve čtvrtině délky konstrukce. Podrobné řešení harmonického buzení je uvedeno v příloze P4 – Statický výpočet.

5 ZÁVĚR

Úkolem práce bylo navrhnout 3 varianty lávek přemostění údolí. Byla vybrána nejvhodnější varianta (z hlediska estetického i z hlediska náročnosti výstavby a následné údržby) a tato varianta byla dále podrobně posouzena.

Vybrána byla tedy varianta předpjatého pásu s externími kabely. Tato varianta se nejlépe začleňuje do rázu krajiny.



Obrázek 27: Vizualizace lávky

Konstrukce lávky byla vymodelována v programu Ansys 14.0 pro řešení podélného směru a v programu Scia Engineer 15.1 pro řešení příčného směru a opěry. Modelování v programu Ansys bylo uvažováno v několika fázích, ve kterých byla tato lávka posouzena. V první montážní fázi byla nalezena výchozí geometrie, a to pomocí iterace ze získaných deformací a vnitřních sil na modelu v Ansysu. V dalších fázích byla mostovka předepnuta finálními lany a zatížena nahodilým zatížením. V mezním stavu únosnosti byla posouzena mostovka v čase t_{∞} a také montážní a visutá lana a závěsy v časech $t_{\text{montážní}}$, t_0 , t_{∞} . V mezním stavu použitelnosti byla posouzena finální lana a mostovka v časech t_0 a t_{∞} . Všechny tyto posudky vyhověly. V programu



Scia byla lávka modelována pro řešení příčného směru. V tomto modelu byla posouzena mostovka na mezní stav únosnosti v časech t_a a t_∞ . V programu Scia byla také namodelována opěra, která byla posouzena na zatížení vyvozené visutými lany.

Dále byla také provedena modální analýza konstrukce v programu Ansys. Byly zjištěny vlastní tvary a frekvence konstrukce a byla posouzena frekvence 1. podélného tvaru a podíl frekvencí 1. podélného tvaru s frekvencí 1. torzního tvaru. Dále byly zjištěny 4 body, ve kterých je předpokládána největší amplituda. V těchto bodech může dojít k rezonanci. Budící síla je 180 N a dle posudku lávka vyhoví na harmonické buzení.

Ve všech uvažovaných posudcích konstrukce vyhověla limitním hodnotám.

V Ostravě, dne 7. 1. 2017

Bc. Gabriela Tomisová

6 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Situace širších vztahů	11
Obrázek 2: Začlenění situace mostu do reálného prostředí	11
Obrázek 3: Půdorys varianty 1.....	12
Obrázek 4: Podélný řez varianty 1	13
Obrázek 5: Příčné řezy varianty 1	13
Obrázek 6: Půdorys varianty 2.....	14
Obrázek 7: Podélný řez varianty 2	14
Obrázek 8: Příčný řez varianty 2.....	14
Obrázek 9: Půdorys varianty 3.....	15
Obrázek 10: Podélný řez varianty 3.....	15
Obrázek 11: Příčný řez varianty 3	16
Obrázek 12: Srovnání variant.....	16
Obrázek 13: Vizualizace lávky.....	17
Obrázek 14: Model lávky v programu Ansys 14.0	22
Obrázek 15: Schéma filozofie působení pilíře	23
Obrázek 16: Schéma iterace.....	24
Obrázek 17: Reálné charakteristiky segmentu mostovky	26
Obrázek 18: Teplotní mapa ČR	31
Obrázek 19: Teplotní mapa ČR	31
Obrázek 20: Axonometrie modelu mostovky v programu Scia Engineer 15.1	35
Obrázek 21: Detail modelu mostovky v programu Scia Engineer.....	36
Obrázek 22: Zobrazení podepření mostovky v časech t_0 a t_∞	36
Obrázek 23: Zobrazení podepření mostovky v čase $t_{\text{montážní}}$	36
Obrázek 24: Zatížení ostatním stálým zatížením	37
Obrázek 25: Zatížení nahodilým zatížením	37
Obrázek 26: Schéma posuzovaných oblastí mostovky v příčném směru	38
Obrázek 27: Vizualizace lávky.....	41



7 SEZNAMY POUŽITÝCH ZDROJŮ

7.1 NORMY

- [1] **ČSN EN 1990 Eurokód:** Zásady navrhování konstrukcí. 2004-03-01.
- [2] **ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1:** Zatížení konstrukcí - Část 1-1: Obecná zatížení - Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb. 2004-03-01.
- [3] **ČSN EN 1991-2 Eurokód 1:** Zatížení konstrukcí - Část 2: Zatížení mostů dopravou. 2005-07-01.
- [4] **ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2:** Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. 2011-07-01.
- [5] **ČSN EN 1992-2 Eurokód 2:** Navrhování betonových konstrukcí - Část 2: Betonové mosty - Navrhování a konstrukční zásady. 2007-05-01.

7.2 ODBORNÁ LITERATURA

- [1] **ZICH, M., Příklady posouzení betonových prvků dle Eurokódů.**
Praha: Dashöfer, 2010, 145 s. ISBN 978-80-86897-38-7.
- [2] **NAVRÁTIL, J., Předpjaté betonové konstrukce,** CERM, 2008

7.3 WEBOVÉ STRÁNKY

- [1] **Google maps.** *Google* [online]. Česká republika: -, 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://www.google.cz/maps/@49.959482,14.1986948,337m/data=!3m1!1e3>
- [2] **Mapy.cz.** *Mapy.cz* [online]. Česká republika: -, 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.2035306&y=49.9586741&z=15&source=muni&id=3618>



8 SEZNAM PŘÍLOH

- P1 1 – Schéma varianty 1
2 – Schéma varianty 2
3 – Schéma varianty 3
4 – Srovnání variant
- P2 1 – Půdorys
2 – Podélný řez
3 – Příčné řezy
4 – Tvar segmentu
5 – Výkres předpínací výztuže
6 – Výkres betonářské výztuže segmentu
7 – Výkres betonářské výztuže pilíře
8 – Výkres betonářské výztuže monolitické části
- P3 1 – Fáze výstavby
2 – Vizualizace
- P4 1 – Statický výpočet
2 – Výstupy z modelů